第 37 卷第 14 期
2017 年 7 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.14
Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604050618
弋良朋,王祖伟.滨海盐渍土壤中不同类型盐生植物富集镉的效应.生态学报,2017,37(14):4656-4662.
Yi L P, Wang Z W.Effects of different types of halophytes on the concentration of cadmium in coastal saline soil.Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4656-4662.

滨海盐渍土壤中不同类型盐生植物富集镉的效应

弋良朋*,王祖伟
天津师范大学城市与环境科学学院,天津　300387

摘要:为了利用被镉污染的滨海盐渍土壤,通过实验对比分析 3 种不同类型盐生植物对盐渍土中镉的富集效应,以期初步探明不同类型盐生植物在镉污染盐渍土壤修复中的效果。选择的 3 种盐生植物类型是:聚盐盐生植物,泌盐盐生植物和避盐盐生植物。通过温室盆栽实验,将植物在不同镉含量的盐渍土壤中种植培养 60 d,测定和分析不同类型盐生植物对镉的生物浓缩因子、转移系数以及植株内地上部分和根部生物量和镉含量的变化。结果表明,不同镉含量的土壤对碱蓬和芦苇的生长影响较小,对二色补血草的生长影响较大。不同镉含量的土壤中,芦苇地上部分镉的生物浓缩因子变化差异不显著,并且其地上部分吸收镉的百分率较高。碱蓬和芦苇的转移系数大于二色补血草的转移系数,并且碱蓬的转移系数在不同镉含量的土壤中变化不显著;二色补血草的转移系数随着土壤中镉含量的增加而显著增大。3 种盐生植物中,碱蓬最具修复镉污染盐渍土壤的潜力,这可能和它是聚盐盐生植物的生理类型有关。芦苇整个植株的地上部分富集镉的总量在 3 种植物中是最高的,因此,芦苇在镉含量较低时也可以做为镉污染盐渍土壤的修复材料。

关键词:滨海盐渍土壤;盐生植物;镉;富集

Effects of different types of halophytes on the concentration of cadmium in coastal saline soil

YI Liangpeng*, WANG Zuwei
College of Urban and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: In order to utilize saline soil polluted with Cd in the coastal region, the experiment was conducted to analyze the differences in accumulation of Cd by three types of halophytes and to determine the effectiveness of the different halophytes in the remediation of saline soils polluted with Cd. The study was conducted using pot experiments in a greenhouse, and salt accumulating, salt secreting, and salt avoiding plants were used as the study subjects. The halophytes were planted with supplies of salt and Cd, and the bioconcentration factor, translocation factor, biomass, and Cd content of the above ground parts and the root were investigated after 60 days of culture. The results indicated that different Cd contents in the soil had little effect on the growth of *Suaeda glauca* and *Phragmites australis*, but had a greater influence on the growth of *Limonium bicolor*. The variation of the Cd concentration factor in the aboveground parts of *Phragmites australis* was not significant, and the percentage of Cd uptake in the aboveground part was higher. The translocation factor in *S. glauca* and *P. australis* was greater than that in *L. bicolor*; the translocation factor in *S. glauca* did not change significantly with the change in Cd contents in the soil, but it increased greatly in *L. bicolor*. Among the three types of halophytes, *S. glauca* had the highest potential to remediate coastal saline soil polluted with Cd, which may be related to the physiological type of this halophyte as salt accumulating plant. Among the three types of halophytes, *P. australis* accumulated the highest total amount of Cd in

基金项目:国家自然科学基金项目(40940010,40973078)
收稿日期:2016-04-05;　　**网络出版日期**:2017-03-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yiliangpeng@126.com

the aboveground parts. Therefore, *P. australis* can be used to remediate soils that have lower Cd levels.

Key Words: coastal saline soil; halophytes; cadmium; concentration

随着人类对含镉矿石的大规模开采和加工,镉产品和镉材料在工农业生产和人们生活中的广泛应用,产生了大量堆积的含镉废石和尾矿等固体废弃物,其被不合理堆放并淋滤溶解,造成镉元素的迁移和扩散,导致一些地方的土壤受到镉污染,对环境中的生物和人体健康造成了潜在的威胁[1-2]。另外,由于污灌、违法排放工业废水和违法使用污泥等原因,我国已有大量镉污染的土地,面积达 1.4×10^4 hm^2,其中就有一些是滨海的盐土和盐化土土地[3],这些土地中很多是现在正在开发利用和将来可能开发利用的土地资源,如天津滨海新区,山东东营等地[4]。重金属镉污染土壤的彻底治理修复是当今土壤修复领域的重点和难点,而利用植物修复是可被选择的有效方法之一,目前利用植物修复镉污染土壤的研究和应用也较多,也发现了一些镉超级累植物[5-6],但既能在滨海盐渍土壤上良好生长又能高效修复镉污染土壤的植物研究很少。对于受镉污染的盐渍土壤,非盐生植物生长不良,而盐生植物由于对盐渍土壤环境有良好的适应性,通过盐生植物萃取土壤中的重金属镉,从而达到修复受镉污染的盐渍土壤是非常有效并具有广阔应用前景的植物修复技术,并已有人进行了相关的初步研究[3,7-8]。

根据盐生植物对盐渍土壤生理适应机制的不同,一般将盐生植物分成 3 种类型:聚盐盐生植物、泌盐盐生植物和避盐盐生植物[9]。这 3 种类型的盐生植物对不同含量镉污染土壤的适应性以及它们对镉的富集效果有什么差异,目前尚未见报道。本研究通过人工栽培实验分析 3 种不同类型盐生植物在镉污染盐渍土壤条件下的适应情况,以期初步认识不同类型盐生植物对滨海地区镉污染盐渍土壤的修复效果,为修复利用和开发这些滨海盐渍土壤提供理论基础,也为将来相关的研究提供支撑数据。

1　材料与方法

1.1　实验材料

实验采用人工控制盆栽植物的方法获得植物样品,盆栽所用土壤为天津大港地区未受镉污染的盐渍土壤,采集表土层(0—30 cm)的混合土壤,土壤类型为滨海盐土,主要盐类是氯化钠,土壤质地为粘壤,土壤的主要化学性质见表 1。将采集回来供栽培植物用的土壤先除去植物根茎及杂质,然后晾干,混合均匀并研碎备用。实验采用的 3 种植物分别属于 3 种类型盐生植物的典型种类,其中,碱蓬(*Suaeda glauca*)是典型的聚盐盐生植物,二色补血草(*Limonium bicolor*)是典型的泌盐盐生植物,芦苇(*Phragmites australis*)是典型的避盐盐生植物。在实验的前 1 年,在天津滨海盐渍土壤区各地采集实验用植物种子备用。

表 1　所用盐渍土壤的主要化学性质

Table 1　Main chemical characteristics of the salt-affected soil

总盐 Total salt/(g/kg)	pH	有机质 Organic matter/(g/kg)	全氮 Total N/(g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N/(mg/kg)	速效磷 Available P/(mg/kg)	速效钾 Available K/(mg/kg)
8.76	7.21	12.13	1.02	68.32	21.66	87.34

1.2　实验方法

将制备好的土壤装入栽培植物用的花盆,在每个花盆内装入风干的土壤 4 kg,然后进行土壤的镉含量处理,栽培每一种植物的盐渍土壤设置 5 个镉含量水平,即分别在土壤中加入不同量的镉,添加方法是以溶液形式一次性加入不同量的 $Cd(NO_3)_2$,使土壤含镉量(以纯镉计算)分别达到:0,3,6,10,15 mg/kg,每个处理设 4 个重复。已有相关研究表明,当外源镉进入土壤后,由于土壤中各种理化过程,外源镉在土壤中会发生迁移和各种形态转化,外源镉进入土壤后约 30 d,土壤中镉的各种形态基本达到相对稳定[10-11]。因此,将一定量

$Cd(NO_3)_2$溶液加入土壤后,在室温下稳定 30 d,期间加纯净水 4 次,使土壤保持湿润。

土壤稳定处理 30 d 后开始播种 3 种盐生植物的种子,植物种子经消毒和浸种后播入土壤中。出苗后 7 d 进行间苗,使每个花盆中只保留 10 株大小一致的幼苗。每 5 d 浇水 1 次,每个花盆中加入等量的纯净水,并且使水不从花盆底部漏出,在温室内自然光照下生长,间苗 60 d 后分别取样处理和测定[3]。测定项目包括:每个处理中所有植株地上部分和地下部分(根部)的干重;植株地上部分镉含量和地下部分(根部)镉含量。

采样和处理分析样品的过程如下:从每个花盆的土壤中仔细取出整个植株,分开地上部分和地下部分的根部,迅速用水洗净根部,然后在电热干燥箱中烘干植株,分别称量每个处理中植物体地上部分和根部的干重。使用电感耦合高频等离子体发射光谱法(ICP-AES)测定样品中镉的含量,测定仪器为岛津 ICPS7510。

1.3 数据处理方法

数据经过处理后,按下列公式计算镉的生物浓缩因子和转移系数[12-14]:

生物浓缩因子(Bioconcentration factor, BCF)= 植物体中的镉含量(mg/kg) / 土壤中的镉含量(mg/kg)

转移系数=植物体地上部的镉含量(mg/kg) / 植物体地下部(根部)的镉含量(mg/kg)

实验数据采用 SPSS 18.0 统计软件对进行方差分析;利用新复极差法(SSR 法)对结果进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤中不同含量的镉对 3 种植物生长的影响

植物的生物量能在一定程度上反映出其对环境的适应性,同时,较高的生物量也是超级累植物的特征之一。从表 2 可知,不同含量镉的土壤中 3 种植物生长产生的生物量是有差异的。对于碱蓬,不管是地上部分还是地下的根部,在不同镉含量的土壤中生长出的生物量差异都不显著,说明土壤中的镉浓度对碱蓬的生长影响很小,其对土壤中的镉耐受性较强。对于二色补血草,随着土壤中镉含量的增加,地上部分和地下部分的生物量都显著减小,说明土壤中的镉含量对其生长影响很大,并且在较低镉含量时就有显著的影响,说明其对土壤中的镉耐受性较差。对于芦苇,在土壤中镉含量较低时,对其影响不大,但当镉含量较高时,对其地上和地下部分的生长都有抑制作用,说明其对土壤中的镉具有一定的耐受性。实验的每种植物地上部分和根部对土壤中不同含量的镉反映在生物量上的表现趋势是基本一致的,但土壤中较高含量的镉对 3 种植物的生物量影响程度不同。

表 2 土壤中镉含量对 3 种盐生植物地上部分和根部生物量的影响

Table 2 Effects of Cd contents in soil on the dry weight of aboveground and root system of three halophytes

土壤中镉的含量 Cd contents of soil/ (mg/kg)	地上部干重 Dry weight of the aboveground part/ (g/盆)			根部干重 Dry weight of the root system/ (g/盆)		
	碱蓬 *S. glauca*	二色补血草 *L. bicolor*	芦苇 *P. australis*	碱蓬 *S. glauca*	二色补血草 *L. bicolor*	芦苇 *P. australis*
0(CK)	21.54±1.24 a	42.26±1.25 a	31.29±2.11 a	12.65±2.35 a	16.36±1.36 a	12.23±0.68 a
3	22.15±2.05 a	39.31±2.36 a	32.46±2.40 a	13.21±1.54 a	15.52±1.64 a	10.57±1.31 a
6	21.69±0.49 a	19.26±2.54 b	28.75±3.12 a	12.62±1.17 a	7.58±0.83 b	11.68±1.81 a
10	22.14±1.50 a	13.75±1.64 c	29.64±1.22 a	13.75±0.95 a	6.32±0.59 b	11.24±0.82 a
15	21.11±3.21 a	9.88±0.58 d	16.61±0.98 b	12.16±2.26 a	4.15±0.21 c	6.43±0.24 b

不同小写字母表示在 $P<0.05$ 的水平上差异显著

2.2 不同类型盐生植物对土壤中镉吸收量的比较

从表 3 可以看出,在土壤中镉含量较低时,碱蓬地上部分的镉含量显著增加,但土壤中镉含量较高时,植株地上部分镉含量增加不显著,而随着土壤中镉含量的增加,碱蓬根部镉含量是持续增加的。二色补血草地上部分和根部的镉含量随着土壤中镉含量的增加都显著增加。对于芦苇,随着土壤中镉含量的增加,植株地上部分和根部的镉含量也都显著增加,但芦苇地上和地下部分的镉含量比碱蓬和二色补血草都明显低。3 种植物的地上和地下部分相对于土壤中的镉含量都有显著增加,说明这 3 种植物对土壤中的镉都有富集作用,

芦苇对镉的富集作用相对较小。在不同镉含量的土壤中,不同类型盐生植物体内镉含量差别很大。地上部分和根部镉含量从大到小的顺序是:碱蓬>二色补血草>芦苇,这与 3 种植物对盐分的生理适应表现相似[9],可能与它们对盐离子的代谢机理有关。

表 3　不同类型盐生植物地上部分和根部镉含量的比较

Table 3　The Cd contents in different types of halophytes

植物种类 Species	土壤中镉的含量 Cd contents of soil/ (mg/kg)	地上部镉含量 Cd contents of the aboveground part/ (mg/kg)	根部镉含量 Cd contents of the root system/ (mg/kg)
碱蓬 *S. glauca*	3	34.69±2.36 c	68.36±5.12 d
	6	42.09±5.17 b	76.51±2.69 c
	10	50.42±2.14 a	85.74±4.67 b
	15	52.16±3.42 a	98.53±5.26 a
二色补血草 *L. bicolor*	3	22.54±1.54 d	60.26±4.46 d
	6	28.35±1.67 c	72.16±3.58 c
	10	35.58±1.58 b	85.34±5.61 b
	15	51.24±3.44 a	97.36±2.46 a
芦苇 *P. australis*	3	10.50±0.29 d	17.13±1.81 d
	6	20.36±1.25 c	38.48±2.36 c
	10	31.53±0.39 b	57.31±4.58 b
	15	43.24±5.27 a	64.56±6.14 a

植物体内镉的总量不仅和其体内的镉含量有关,还与其生物量有关。通过表 4 可知,3 种植物中,在不同镉含量的土壤中生长的碱蓬整个植株和地上部分含镉的总量几乎都大于二色补血草和芦苇,在土壤镉含量很高时表现地更加明显。碱蓬和芦苇植物体地上部分、根部和整个植株含镉总量随着土壤中镉含量的增加而增大,但二色补血草的表现却与碱蓬和芦苇相反。从植物体地上部分镉总量占整个植株中镉总量的比例来看,碱蓬地上部分镉的总量占植物体内所有镉的 46%—49%,并且不同镉含量的土壤差别不大;二色补血草地上部分镉的总量占植物体内所有镉的 50%左右;芦苇地上部分镉的总量占植物体内所有镉的 55%—66%。从以上数据分析可知,碱蓬在 3 种盐生植物中从盐渍土壤中吸收镉的能力是最强的,芦苇地上部分获得镉的能力相对较强。3 种植物地上部分镉的量占整个植物体含镉量在 40%—65%之间,表明 3 种盐生植物从土壤中吸收的镉大约有 1/2 被输送到了地上部分,同时根部富集镉的量也比较多。

表 4　不同类型盐生植物地上部分和根部吸收镉的总量比较

Table 4　The total amounts of Cd in different types of halophytes

植物种类 Species	土壤中镉的含量 Cd contents of soil/ (mg/kg)	地上部镉总量 Cd total amounts of the aboveground part/ (g/盆)	根部镉总量 Cd total amounts of the root system/ (g/盆)	植物体镉总量 Cd total amounts of the plant/ (g/盆)	地上部吸镉百分率 Percentages of cadmium in the aboveground part/%
碱蓬 *S. glauca*	3	0.7684±0.0152 c	0.9030±0.0254 b	1.6714±0.0831 b	46.0
	6	0.9130±0.0141 b	0.9656±0.0547 b	1.8785±0.1952 b	48.6
	10	1.1163±0.0782 a	1.1789±0.0691 a	2.2952±0.2646 a	48.6
	15	1.1011±0.0691 a	1.1981±0.0719 a	2.2992±0.0743 a	47.9
二色补血草 *L. bicolor*	3	0.8860±0.0514 a	0.9352±0.0782 a	1.8213±0.2514 a	48.6
	6	0.5460±0.0542 b	0.5470±0.0942 b	1.0930±0.0147 b	50.0
	10	0.4892±0.0368 b	0.5393±0.0428 b	1.0286±0.0464 b	47.6
	15	0.5063±0.0257 b	0.4040±0.0144 b	0.9103±0.0562 b	55.6
芦苇 *P. australis*	3	0.3408±0.0912 d	0.1811±0.0254 c	0.5219±0.0125 c	65.3
	6	0.5853±0.0415 c	0.4494±0.0654 b	1.0348±0.0587 b	56.6
	10	0.9346±0.0251 a	0.6442±0.0356 a	1.5787±0.0698 a	59.1
	15	0.7182±0.0635 b	0.4151±0.0842 b	1.1333±0.0721 b	63.3

2.3 土壤中不同类型盐生植物对镉吸收效率的比较

生物浓缩因子是用来显示某种物质在生物体内累积趋势的重要指标,也是衡量植物富集重金属及其它物质能力的重要指标之一[15],其值越大,表明植物对重金属的吸收累积能力越强[16]。转移系数是指植物地上部某种元素含量与地下部分(根部)该种元素含量的比值,反映植物将重金属从地下部转移到地上部的能力,转移系数越大,植物向地上部转移重金属的能力就越强[17-18]。从表5可以看出,在土壤中镉含量较低时,碱蓬和二色补血草地上和地下部分生物浓缩因子都较大,随着土壤中镉含量的增加,镉的生物浓缩因子逐渐减小,并且都差异显著,说明碱蓬和二色补血草在镉含量较低时,对镉富集能力最强。碱蓬和二色补血草对镉的生物浓缩因子在根部的表现与地上部分相同,但根部的生物浓缩因子明显大于地上部分,说明地下部分富集镉的能力比地上部分强。随着土壤中镉含量的增加,芦苇地上部分生物浓缩因子在土壤中镉含量低时,相对碱蓬和二色补血草都小,另外,芦苇地上部分生物浓缩因子的变化差异不显著,说明其地上部分对土壤中镉含量的变化不敏感;芦苇根部的生物浓缩因子只有在土壤中镉含量很高时有所下降,说明其对镉的富集能力只有在土壤中镉含量很高时才会下降。从表 5 中的转移系数分析结果可以看出,碱蓬和芦苇的转移系数都在0.50—0.60 之间,几个处理大多大于二色补血草的转移系数。在不同镉含量的土壤中,碱蓬转移系数变化不显著,说明镉在碱蓬体内的分配不受土壤中镉含量的影响。二色补血草的转移系数随着土壤中镉含量的增加而增大,在高浓度镉含量的土壤中,其转移系数增加较大;芦苇在不同镉含量土壤中的转移系数也有增加的趋势,说明土壤中的镉含量能够影响二色补血草和芦苇体内镉的分配。

表 5 不同类型盐生植物对镉的生物浓缩因子和转移系数

Table 5 The Cd BCFs and translocation factors in different types of halophytes

植物种类 Species	土壤中镉的含量 Cd contents of soil/ (mg/kg)	地上部生物浓缩因子 BCFs of the aboveground part	根部生物浓缩因子 BCFs of the root system	转移系数 Translocation factors
碱蓬 *S. glauca*	3	11.56±2.10 a	22.79±2.69 a	0.51±0.02 a
	6	7.02±0.59 b	12.75±1.15 b	0.55±0.04 a
	10	5.04±0.67 c	8.57±0.86 c	0.59±0.09 a
	15	3.48±0.25 d	6.57±0.42 d	0.53±0.05 a
二色补血草 *L. bicolor*	3	7.51±0.69 a	20.09±1.27 a	0.37±0.01 c
	6	4.73±0.57 b	12.03±1.46 b	0.39±0.04 b
	10	3.56±0.61 c	8.53±0.82 c	0.42±0.06 b
	15	3.41±0.24 c	6.49±0.64 d	0.53±0.08 a
芦苇 *P. australis*	3	3.50±0.65 a	5.71±0.41 a	0.61±0.02 a
	6	3.39±0.37 a	6.41±0.85 a	0.53±0.06 b
	10	3.15±0.62 a	5.73±0.96 a	0.55±0.08 b
	15	2.88±0.91 a	4.30±0.71 b	0.67±0.05 a

3 讨论

镉是植物的非必需元素,在植物体内累积到一定程度,就会影响植物的正常生长和发育,最终表现为生物量下降,甚至死亡[18]。植物能富集或超富集重金属来修复被重金属污染的土壤是基于其对重金属的抗性,超积累植物对重金属有很强的耐性,表现在植物能够在较高的重金属浓度土壤上正常生长,不出现明显的受毒害症状[19]。植物对镉的耐受性因土壤镉污染浓度和植物种类不同而有所差异,有研究表明,低浓度的镉对某些植物的生长有一定的促进作用,较高浓度的镉会降低植物的光合生产力,干扰体内营养物质的迁移和再分配,影响植物生长[7,18]。本实验中,土壤中镉含量均显著影响二色补血草地上部分和根部的生物量,而对碱蓬和芦苇影响不大,说明 3 种植物中泌盐盐生植物二色补血草的对镉的耐受性低于其它两种植物,土壤中不同镉的含量对聚盐盐生植物碱蓬的生长均无影响,可能是因为碱蓬是典型的聚盐盐生植物和喜钙植物,能大量

吸收盐分到植物体内聚集,同时对含钙量高的土壤也有较好的适应性,而镉和钙在某些化学性质上相似,在植物体内的代谢过程也有相似的地方[20-22],聚盐盐生植物碱蓬对镉的难受性可能与其对钙的耐受性有关,但还需对相关机理进行更深入的研究,相关的研究不但可以促进和发展植物生理学的有关理论,还有助于为优化与改良镉污染土壤植物修复方法提供理论指导。

超级累植物一般有 3 个主要特征:(1)体内某一物质浓度大于一定的临界值;(2)植物吸收的某种物质大部分转移分布到了地上部分,即有较高的地上部/根浓度比率;(3)在某种物质污染的土壤上这些植物能够良好生长,不会发生这种物质严重毒害植物体的情况[23]。在相同时间内植物吸收镉的总量也是利用植物进行镉污染土壤修复的一个重要指标,从实验结果来看,相比其它两种盐生植物,在相同种植时间内,聚盐盐生植物碱蓬地上部分和整个植物体镉的总量都是最大的,从地上部吸镉百分率和转移系数来看,碱蓬地上部和根部的生物浓缩因子也都较大,碱蓬的耐旱性很好,在滨海地区资源很丰富,人工栽培也较容易[24],因此,在 3 种盐生植物中,聚盐盐生植物碱蓬最具修复镉污染土壤的潜力,碱蓬作为镉污染盐渍土壤的修复具有很好的应用价值和便利条件。避盐盐生植物芦苇在镉含量较低时,植株富集镉的能力也是较强的,并且镉对其生物量的影响较小,同时,芦苇整个植株的地上部分富集镉的总量占整个植物体的比例在 3 种植物中是最高的,超过了 50%,说明其植物体向地上部转移重金属镉的能力较强,因此,避盐盐生植物芦苇在镉含量较低时也可以做为镉污染盐渍土壤的修复材料。3 种植物根部镉的总量大约占了整个植物体的 1/2,所以,利用盐生植物来修复镉污染的盐渍土壤时,如果在使用过程中,连同根部一起去除,那么受镉污染盐渍土壤中通过植物富集去除镉的效率会更高。

本实验只利用了盆栽方法对 3 种类型的盐生植物富集镉的效应进行了研究,在将来的研究中还会对更多种不同类型的滨海盐生植物和各种盐含量的盐渍土壤进行相关的实验对比研究,有望进一步探明这 3 种类型盐生植物富集镉的效应,得出更普遍的实验结果。通过对更多种盐生植物的相关研究,以期找到生物量更大,对镉富集效率更高的盐生植物用于修复镉污染的盐渍土壤,并且进一步会在自然条件下进行有关实验验证工作。从本研究的实验结果来看,聚盐盐生植物,泌盐盐生植物和避盐盐生植物对土壤中的镉表现出了不同的反应,其中藜科聚盐盐生植物碱蓬对镉污染盐渍土壤有很好的抗性,聚盐盐生植物在滨海盐渍土壤地区还有很多种类,对这一类植物的不断研究和实验,有望选择富集镉效率更高,对镉污染土壤修复效果更好的植物种类,并且聚盐盐生植物的植物体还能够大量吸收土壤中的盐分[25],在去除富集了镉的植物体的同时,也能去除土壤中的盐分,减轻土壤的盐渍化,具有一举两得的效果。

植物修复镉污染盐渍土壤的技术更接近自然生态恢复,具有投资少、修复周期短并且无二次污染等优点,同时可以净化与美化生态环境、增加土壤有机质含量和肥力,适用于大面积修复利用[26-28],但很多研究表明,安全并廉价的植物尚无法在盐渍土壤地区得到推广,因为这些镉超级累植物多不耐盐碱,而且不耐干旱,只适合在非盐渍的湿润土壤上生长,尤其在我国北方滨海地区,气候较干旱,许多镉含量较高的土壤都存在盐碱化的问题,使治理的难度进一步增大。因此,选择盐生植物应用于土壤镉污染修复是很有必要的。本研究的实验结果可对将来筛选这类植物提供参考和有关启发。另外,在植物修复为主的土壤修复技术基础上,辅以微生物、化学或农业生态修复技术提高植物修复的综合效率,也是未来植物修复的研究和发展方向之一,开发微生物-植物联合修复技术、化学-植物联合修复技术也是未来的发展方向。盐生植物修复滨海地区镉污染盐渍土壤还需进一步研究现有治理技术修复过程中的作用机理和影响因素等,以实现滨海盐渍土壤镉污染修复的稳定性、彻底性和长期性。

4　结论

3 种典型盐生植物富集镉的对比实验研究显示,不同镉含量的土壤对聚盐盐生植物碱蓬和避盐盐生植物芦苇的生长影响较小,但对泌盐盐生植物二色补血草的生长影响较大。3 种植物地上部分镉的量占整个植物体含镉总量在 40%—66%之间,避盐盐生植物芦苇在 3 种盐生植物中地上部分吸收镉的能力是最强的,而聚

盐盐生植物碱蓬和泌盐盐生植物二色补血草根部富集镉的能力比地上部分强,并且碱蓬和二色补血草在镉含量较低时,整个植株对镉富集能力最强。避盐盐生植物芦苇地上部分对镉的生物浓缩因子在土壤中镉含量低时较小,并且其地上部分镉的生物浓缩因子变化差异不显著,说明其地上部分对土壤中镉含量的变化不敏感,对镉的富集能力只有在土壤中镉含量很高时才有所下降。聚盐盐生植物碱蓬和避盐盐生植物芦苇的转移系数大于泌盐盐生植物二色补血草的转移系数,其中碱蓬的转移系数在不同镉含量的土壤中变化不显著;泌盐盐生植物二色补血草转移系数随着土壤中镉含量的增加而增大。

3 种盐生植物中,聚盐盐生植物碱蓬作为镉污染盐渍土壤的修复具有较好的利用价值。避盐盐生植物芦苇在镉含量较低时也可以做为镉污染盐渍土壤的修复材料。

参考文献(References):

[1] Toppi L S D, Gabbrielli R. Response to cadmium in higher plants. Environmental and Experimental Botany, 1999, 41(2): 105-130.

[2] 莫斌吉, 雷良奇, 黄祥林, 赵蛟彬, 徐沛斌. 镉在硫化矿尾矿中的地球化学行为及其污染防治. 有色金属(矿山部分), 2014, 66(2): 34-38.

[3] 弋良朋, 王祖伟. 土壤中三种盐对油菜富集镉的影响. 生态环境学报, 2010, 19(4): 798-802.

[4] 王祖伟, 王中良. 天津污灌区重金属污染及土壤修复. 北京: 科学出版社, 2014.

[5] Wójcik M, Tukiendorf A. Glutathione in adaptation of *Arabidopsis thaliana* to cadmium stress. Biologia Plantarum, 2011, 55(1): 125-132.

[6] 魏树和, 杨传杰, 周启星. 三叶鬼针草等 7 种常见菊科杂草植物对重金属的超富集特征. 环境科学, 2008, 29(10): 2912-2918.

[7] 陈雷, 杨亚洲, 郑青松, 张春银, 王爽, 许彩云, 葛滢. 盐生植物碱蓬修复镉污染盐土的研究. 草业学报, 2014, 23(2): 171-179.

[8] 利锋. 镉污染土壤的植物修复. 广东微量元素科学, 2004, 11(8): 22-26.

[9] 赵可夫, 范海. 盐生植物及其对盐渍生境的适应生理. 北京: 科学出版社, 2005.

[10] 王祖伟, 弋良朋, 高文燕, 曾祥峰, 王中良. 碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响. 生态学报, 2012, 32(23): 7512-7518.

[11] Fässler E, Robinson B H, Gupta S K, Schulin R. Uptake and allocation of plant nutrients and Cd in maize, sunflower and tobacco growing on contaminated soil and the effect of soil conditioners under field conditions. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 87(3): 339-352.

[12] 史建君, 孙志明, 陈晖, 王寿祥, 陈传群. 客土覆盖对降低放射性锶在作物中积累的效应. 环境科学, 2002, 23(4): 126-128.

[13] Jeong S, Moon H S, Nam K, Kim J Y, Kim T S. Application of phosphate-solubilizing bacteria for enhancing bioavailability and phytoextraction of cadmium (Cd) from polluted soil. Chemosphere, 2012, 88(2): 204-210.

[14] Hasanuzzaman M, Hossain M A, Fujia M. Physiological and biochemical mechanisms of nitric oxide induced abiotic stress tolerance in plants. American Journal of Plant Physiology, 2010, 5(6): 295-324.

[15] Zayed A, Gowthaman S, Terry N. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(3): 715-721.

[16] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P B A, Dushenkov V, Ensley B D, Chet I, Raskin I. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Nature Biotechnolgy, 1995, 13(5): 468-474.

[17] Mattina M I, Lannucci-Berger W, Musante C, White J C. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil. Environmental Pollution, 2003, 124(3): 375-378.

[18] 杨艳, 吴宗萍, 张敏, 李政, 李凌. 头花蓼对重金属 Cd 的吸收特性与累积规律初探. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2094-2099.

[19] 李云, 张世熔, 张少卿, 邓良基, 李婷, 徐小逊. 野茼蒿对镉的富集及其镉耐性. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1296-1302.

[20] 宋正国, 徐明岗, 李菊梅, 居学海, 唐世荣. 钙对土壤镉有效性的影响及其机理. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1705-1710.

[21] 刘昭兵, 纪雄辉, 田发祥, 彭华, 吴家梅, 石丽红. 碱性废弃物及添加锌肥对污染土壤镉生物有效性的影响及机制. 环境科学, 2011, 32(4): 1164-1170.

[22] Bolan N S, Adriano D C, Mani P A, Duraisamy A. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition. Plant and Soil, 2003, 251(2): 187-198.

[23] 杨海琳. 土壤重金属污染修复的研究. 环境科学与管理, 2009, 34(6): 130-135.

[24] 张爱琴, 庞秋颖, 阎秀峰. 碱蓬属植物耐盐机理研究进展. 生态学报, 2013, 33(12), 3575-3583.

[25] 蒋高明. 植物生理生态学. 北京: 高等教育出版社, 2004.

[26] 李精超, 胡小凤, 李文一, 徐卫红. 设施蔬菜基地土壤重金属污染分析及防治研究. 中国农学通报, 2010, 26(18): 393-396.

[27] 王铁宇, 周云桥, 李奇锋, 吕永龙. 我国化学品的风险评价及风险管理. 环境科学, 2016, 37(2): 404-412.

[28] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, Kochian L V. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread wheat and durum wheal seedlings. Physiologia Plantarum, 2002, 116(1): 73-78.